

Séchage convectif et propriétés hydro-thermiques de trois espèces de bois résineux

Rim BAHAR¹, Sahbi OUERTANI¹, Soufiene AZZOUZ¹, Mohamed Taher ELAIB², Afif ELCAFCI¹

¹Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermique et Massique, Département de Physique, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar.

²Laboratoire de Gestion et de Valorisation des Ressources Forestières. INRGREF. Tunis

Email : rim.bahar@hotmail.fr

Résumé : L'objectif de ce travail consiste à étudier les cinétiques de séchage convectif de trois espèces de bois résineux (le pin d'Alep, le pin Pignon et le pin Brutia) de la région du nord de la Tunisie sous forme de planches de dimensions (30*5*2 cm³). La température, l'humidité relative et la vitesse de l'air de séchage sont compris respectivement entre 60 et 80 °C, 28 et 70 % et 2,5 m.s⁻¹. Les propriétés thermo-hydriques de trois espèces de bois résineux à savoir : les isothermes de désorption, la chaleur de sorption, la masse volumique et le retrait volumique ont été déterminées expérimentalement. Les résultats relatifs aux propriétés de transfert et d'équilibre discutés et les travaux récents de la littérature ont permis d'optimiser les tables de séchage spécifiques à chaque type d'espèce de bois étudié. Les résultats expérimentaux montrent que la durée des opérations de séchage est comprise entre 23 et 30 heures.

Mots clés : séchage convectif, bois résineux, isothermes de désorption, masse volumique, table de séchage

1. Introduction

De nombreux produits humides doivent passer par des opérations de séchage avant leur exploitation afin d'assurer leur stabilisation et leur conservation [1]. La connaissance des propriétés physiques du bois est une étape indispensable pour une utilisation adéquate de ce dernier ainsi qu'une base de données pour la conception des séchoirs industriels et l'optimisation et la simulation des processus de séchage [2], [3] et [4]. Les isothermes de désorption permettent de connaître les états hydro-thermiques du bois sous des conditions climatiques bien définies. La connaissance de la masse volumique des matériaux reflète d'une manière macroscopique la relation entre la masse et le volume [5]. La masse volumique et le retrait volumique sont des propriétés intrinsèques du produit et reflètent le comportement de ce dernier au cours de l'opération de séchage. La conduite du cycle de séchage déduite pour chaque type d'espèce de bois étudié se compose de cinq phases : montée en température du produit, réchauffage, séchage, équilibrage et refroidissement. Les conditions opératoires de ces phases sont optimisées en fonction de l'espèce de bois étudié.

2. Matériels et Méthodes

2.1 Isotherme de désorption

Les isothermes de sorption permettent de donner une relation entre la teneur en eau d'équilibre et l'humidité relative de l'air environnant pour une température donnée. Elle renseigne sur l'équilibre hygroscopique et sur le type de fixation de l'eau dans le matériau étudié [6] et [7]. La méthode gravimétrique statique basée sur des solutions salines saturées a été adaptée à l'échelle du laboratoire. En pratique on utilise des bocaux contenant neuf solutions salines saturées qui couvrent une large plage d'humidité relative allant de 5 à 90 %. Les échantillons de bois utilisés sont de forme parallélépipédique et de faibles dimensions. Ensuite, ces bocaux sont disposés dans une étuve réglée en température. Les essais ont été réalisés pour trois températures (50,60 et 70 °C).

La masse sèche des échantillons de bois a été déterminée après avoir placé les échantillons dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures. La teneur en eau d'équilibre est donnée par la relation suivante :

$$X_{\text{eq}} = \frac{M_{\text{eq}} - M_s}{M_s} \quad (1)$$

2.2 Masse volumique

La masse volumique du bois a été déterminée à l'aide d'une méthode basée sur le principe d'Archimède qui agit sur les corps immergés dans un liquide. Elle consiste tout d'abord à déterminer le poids de l'échantillon dans l'air $W(a)$. Pour cela on place l'échantillon sur le plateau supérieur d'une balance qui enregistre cette valeur. Ensuite, on détermine la poussée hydrostatique G , appliquée à l'échantillon immergé dans du toluène. On place l'échantillon sur le plateau inférieur, de la même balance qui enregistre la valeur de la poussée d'Archimède. Enfin la masse volumique apparente du produit est calculée à l'aide de la relation suivante (formule donnée par le constructeur de l'appareil de mesure) :

$$\rho_{\text{app}} = \frac{w(a) [\rho(f) - 0,0012 \text{ g/cm}^3]}{0,99983 G} + 0,0012 \text{ g/cm}^3 \quad (2)$$

$\rho(f)$: masse volumique du liquide.

$W(a)$: poids du solide dans l'air

$W(f)$: poids du solide dans le liquide.

$G = W(a) - W(f)$: poussée hydrostatique appliquée au solide immergé

$0,0012 \text{ g/cm}^3$: masse volumique de l'air dans les conditions ambiantes

2.3 Retrait volumique

Les expériences de mesure de retrait sont faites avec des échantillons parallélépipédiques de dimensions $(10*5*2) \text{ cm}^3$ sciés dans le sens des fibres. Pour limiter la variabilité du bois les échantillons sont pris dans une même planche. La mesure des dimensions des échantillons au cours du séchage a été effectuée à l'aide d'un pied à coulisse numérique de précision 0,01 mm. La mesure de la masse a été effectuée à l'aide d'une balance numérique de précision 0,01g.

2.4 Cinétiques de séchage convectif

Les cinétiques de séchage convectif du bois sous forme de planches rectangulaires de dimensions $(30*5*2) \text{ cm}^3$ ont été réalisées dans une soufflerie climatique fonctionnant en boucle fermé par convection forcée d'air chaud. Les planches sont placées sur une grille à l'intérieure de la veine d'essais du séchoir et maintenues par un support. Le tout est disposé sur une balance de précision placée à l'extérieur. Cette technique permet le suivi de la perte de masse au cours de l'opération de séchage (Figures 2 et 3).



Figure 2 : Unité de séchage convectif.



Figure 3 : Disposition de la Planche dans le séchoir

3. Résultats et discussion

3.1 Isothermes de désorption

Les courbes expérimentales des isothermes de désorption du bois des Pin d'Alep, Pin Brutia, et Pin pignon à différentes températures (50, 60 et 70 °C) présentent une allure sigmoïdale de type II selon la classification de l'IUPAC. Le modèle thermodynamique sera retenue pour décrire les états d'équilibre hydrothermique du bois. Ainsi l'augmentation de la température provoque une diminution de la teneur en eau du bois. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par [8] pour le pin maritime et [9] pour le bois de palmier.

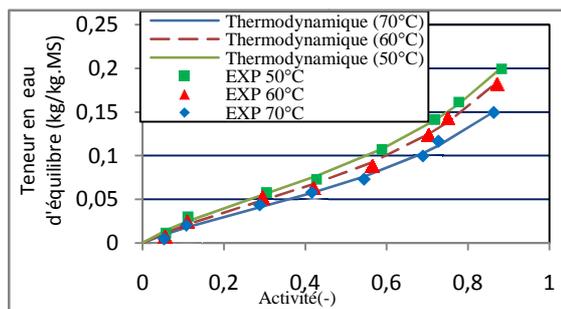
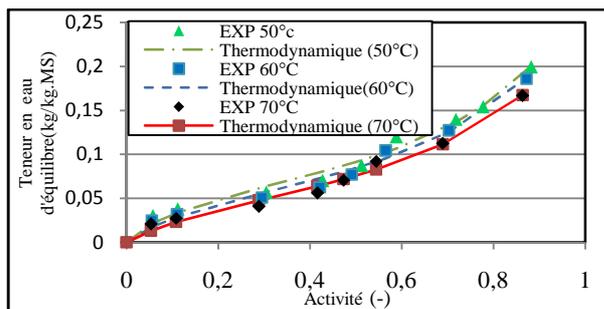


Figure 4 : Teneur en eau à l'équilibre (Pin d'Alep) Figure 5 : Teneur en eau à l'équilibre (Pin Brutia)

3.2. Chaleur isostérique

Dans le domaine hygroscopique où l'eau est fortement liée au produit, la chaleur nécessaire pour évaporer une molécule d'eau est la somme de la chaleur latente de changement de phase et la chaleur de sorption $Q_{st,n}$. La chaleur de sorption peut être déterminée à partir des isothermes de désorption [7].

La chaleur isostérique de désorption peut être calculée à partir d'une relation dérivée de l'équation de Clausius-Clapeyron :

$$\frac{\partial \ln a_w}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} = -\frac{Q_{st,n}}{R} \quad (3)$$

La pente des isostères de désorption nous a permis de déterminer la chaleur isostérique à différente teneur en eau d'équilibre $Q_{st,n} = P \cdot R$

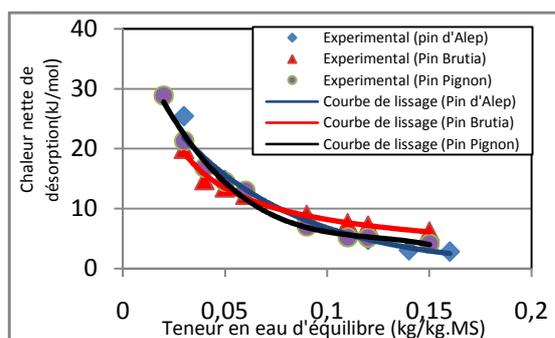


Figure 6 : Chaleur de désorption des trois espèces étudiées

3.3. Masse volumique

La figure 7 traduit la variation de la masse volumique du pin d'Alep en fonction de la teneur en eau pour différentes conditions de séchage. Ces courbes montrent qu'au cours du séchage, la masse volumique diminue avec la diminution de la teneur en eau jusqu'à une valeur limite : c'est le Point de Saturation des Fibres (PSF) signalant le passage au domaine hygroscopique.

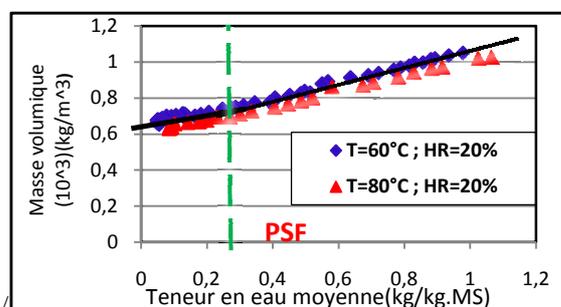


Figure 7: Masse volumique de pin d'Alep en fonction de la teneur en eau moyenne.

3.4 Retrait volumique

Les courbes de variation de retrait volumique en fonction de la teneur en eau du pin d'Alep, du pin Brutia et du pin Pignon montrent que l'évolution du retrait volumique demeure constante jusqu'à atteindre

une valeur limite de la teneur en eau moyenne (Domaine I). Lorsque toute l'eau libre est éliminée, le matériau passe au domaine hygroscopique. L'extraction de l'eau liée provoque un rétrécissement de la matrice solide du bois et par conséquent un changement dimensionnel du matériau. Dans cette zone (Domaine II) le retrait volumique présente une variation linéaire en fonction de la teneur en eau moyenne.

Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par [8] pour le pin maritime.

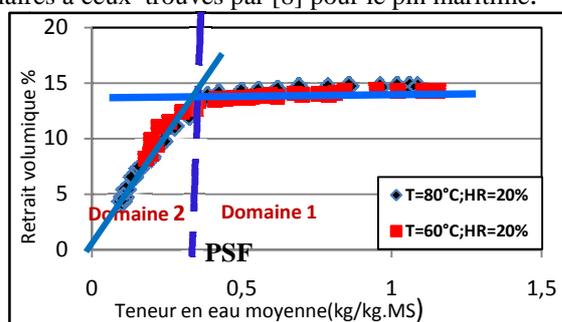


Figure 8 : Retrait volumique du Pin Brutia en fonction de la teneur en eau moyenne

Tableau 1 : PSF des trois espèces d'études

| Espèces | Pin d'Alep | Pin Brutia | Pin Pignon |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|
| Point de Saturation des Fibres (PSF) | 0,32 | 0,36 | 0,33 |

3.5. Conduite de séchage

3.5.1 Optimisation des conditions de séchage convectif

Les tables de séchage (Tableaux 3, 4 et 5) sont optimisées à partir des tables existantes dans la littérature [10]. Elles donnent pour chaque essence, les conditions de séchage optimales en fonction de la teneur en eau d'équilibre du bois. Ces tables tiennent compte des performances techniques du séchoir utilisé. La conduite du cycle de séchage est composée d'une phase de montée en température préchauffage, séchage, équilibrage et refroidissement. Pendant la phase de *Préchauffage*, il est nécessaire de maintenir une humidité relative de l'air élevée afin d'éviter les contraintes de traction et l'apparition des fissurations. Dans la phase de séchage, on assure l'élimination de l'humidité du bois en imposant une ambiance de plus en plus sèche. La phase d'équilibrage a pour but de diminuer les gradients d'humidité au sein du bois en augmentant l'humidité relative de l'air. Pendant la phase de refroidissement, il faut arrêter le chauffage et aérer le séchoir afin d'éviter les chocs thermiques avec le milieu extérieur [2]. Le choix de la table de séchage est basé essentiellement sur la ressemblance des propriétés physiques de l'espèce d'étude et des espèces de références préalablement sélectionnées telles que la masse volumique, le point de saturation des fibres (PSF) et l'équilibre hygroscopiques. Les propriétés physiques déduites expérimentalement et utilisées comme critère de comparaison pour les trois espèces d'étude sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Propriétés physiques des espèces étudiées

| | PSF (%) | $\rho_{\text{initiale}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | $\rho_{\text{sèche}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | $R_{\text{max}} \text{ (%)}$ | $X_{\text{initiale}} \text{ (kg/kg.MS)}$ |
|-------------------------|-----------|--|---|------------------------------|--|
| Pin d'Alep | 32 | 1036 | 560 | 14 | 1,07 |
| Pin Brutia | 36 | 1085 | 630 | 14 | 1,09 |
| Pin Pignon | 33 | 943 | 540 | 15 | 1,02 |
| Pin maritime [6] | 34 | ----- | 530 | 15 | 1,6 |

Les tableaux 3, 4 et 5 présentent respectivement les tables de séchage optimisées des bois de Pin d'Alep, Pin Brutia et Pin Pignon.

Tableau 3 : Table de séchage de pin d'Alep

| X(%) | Phases | Ts (°C) | HR (%) | X _{éq} |
|------|-----------------------|---------|--------|-----------------|
| vert | Montée en température | 5 à 10 | — | — |
| vert | Réchauffage | 60 | 70 | 0,125 |
| vert | Séchage | 60 | 65 | 0,115 |
| 35 | | 65 | 55 | * |
| 32 | | 70 | 55 | 0,085 |
| 30 | | 70 | 50 | 0,077 |
| 28 | | 70 | 45 | 0,07 |
| 25 | | 75 | 45 | * |
| 20 | | 80 | 40 | * |
| 15 | | 80 | 28 | * |
| — | Equilibrage | 80 | 52 | * |
| — | Refroidissement | — | — | — |

Tableau 4 : Table de séchage de pin Brutia

| X (%) | Phases | Ts (°C) | HR(%) | X _{éq} |
|-------|-----------------------|---------|-------|-----------------|
| vert | Montée en température | 5 à 10 | — | — |
| vert | Réchauffage | 70 | 70 | 0,105 |
| vert | Séchage | 70 | 65 | 0,095 |
| 35 | | 70 | 55 | 0,076 |
| 32 | | 70 | 52 | 0,072 |
| 30 | | 75 | 52 | * |
| 28 | | 75 | 50 | * |
| 25 | | 75 | 45 | * |
| 20 | | 80 | 40 | * |
| 15 | | 80 | 28 | * |
| — | Equilibrage | 80 | 65 | * |
| — | Refroidissement | — | — | — |

Tableau 5 : Table de séchage de pin Pignon

| X (%) | Phases | Ts (°C) | HR(%) | X _{éq} |
|-------|-----------------------|-------------|-------|-----------------|
| vert | Montée en température | 5 à 10 | — | — |
| vert | Réchauffage | 65 | 70 | * |
| vert | Séchage | 65 | 65 | * |
| 35 | | 65 | 55 | * |
| 32 | | 65 | 50 | * |
| 30 | | 70 | 50 | 0,075 |
| 28 | | 70 | 45 | 0,065 |
| 25 | | 75 | 40 | * |
| 20 | | 80 | 28 | * |
| — | | Equilibrage | 80 | 52 |
| — | Refroidissement | — | — | — |

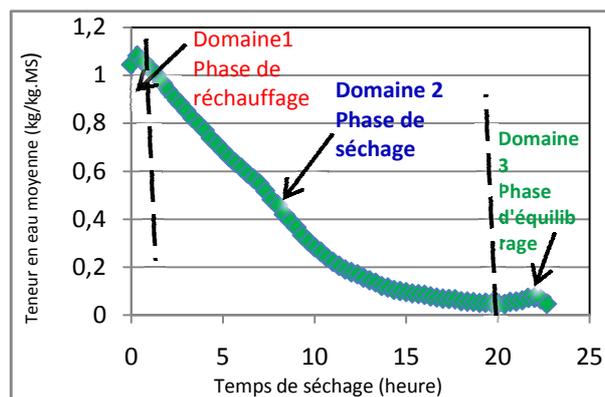


Figure 9 : Evolution temporelle de la teneur en eau du Pin Pignon

Conclusion

La présente communication a été consacrée à une étude expérimentale des propriétés thermo-hydrigue des trois espèces du bois résineux Pin d'Alep, Pin Pignon et Pin Brutia à savoir : les isothermes de désorption à trois températures différentes (50, 60 et 70 °C), la chaleur isostérique, la masse volumique et le retrait volumique à différentes conditions opératoires de séchage. Dans ce travail nous avons aussi établi trois tables de séchage spécifiques à chaque espèce de bois en nous basant sur les tables de séchage existant dans la littérature et sur la ressemblance des propriétés physiques des espèces d'études avec les espèces de références

préalablement sélectionnées. Le temps de séchage est compris entre 22 et 30 heures. En perspective, cette étude nous servira pour améliorer les conditions opératoires à l'échelle industrielle, en développant les modèles de simulation numérique afin de prévoir l'évolution des champs de température, de teneur en eau et des contraintes au sein du produit au cours de l'opération de séchage.

Nomenclature

| | |
|---|---|
| a_w : Activité de l'eau | T : Température °C |
| HR : Humidité relative de l'air [%] | T_s : Température sèche °C |
| M_{eq} : masse sèche kg | X : Teneur en eau base sèche kg/kg |
| M_s : masse sèche kg | X_{eq} : Teneur en eau d'équilibre kg/kg |
| $Q_{\text{st,n}}$: Chaleur isostérique nette de sorption J/mol | ρ : Masse volumique kg/m ³ |
| R : Constante des gaz parfaits 8,32 J/mol.K | |
| R_v : Retrait volumique % | |

Références bibliographiques

- [1] Remond. R., Approche déterministe du séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées, thèse de doctorat, Ecole nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Centre de Nancy. (2004)
- [2] Joly.P and More-Chevalier.F., Théorie, Pratique et Economie du séchage des bois, Edition H. Vial, Dourdan, France, 205 p (1980)
- [3]. Almeida. G., Influence de la structure du bois sur ses propriétés physico mécaniques à des teneurs en humidité élevées, *Thèse de doctorat, Faculté des Etudes Supérieures Université Laval.* (2006).
- [4] Jodin.P.,: Le Bois, matériau d'ingénierie, ARBOLOR, Nancy. 433 p.(1994)
- [5] Nadeau.J.P et Pigualli.J.R., Séchage : des processus physiques aux procédés industriels, cours. (1995)
- [6] Jannot. Y.. Isothermes de sorption : modèles et détermination, cours. (2008)
- [7] Kechaou.N Etude expérimentale du processus de séchage de produits agroalimentaires, thèse de doctorat, Faculté des sciences de Tunis. , (2000).
- [8] Lartigue.C., (1987). Mécanisme élémentaire mis en jeu lors du séchage du pin maritime, thèse de doctorat, Université de Bordeaux I [1] Aléon, D. Chanrion, P. Négrié, G. Perez, J. & Snieg, O.: Séchage du bois (Guide pratique), *Centre Technique du bois et de l'Ameublement (CTBA)*, Paris. (1990)
- [9] Ouertani.S, Azzouz.S, Hassini.L, Belghith.A: Palm wood drying and optimization of the processing parameters wood materials science and engineering, pp; 75-90. (2011)
- [10] Aléon, D. Chanrion, P. Négrié, G. Perez, J. & Snieg, O. : Séchage du bois (Guide pratique), *Centre Technique du bois et de l'Ameublement (CTBA)*, Paris. (1990)